



**MINISTÈRE
DES ARMÉES**

*Liberté
Égalité
Fraternité*



Association Aéronautique
et Astronautique de France

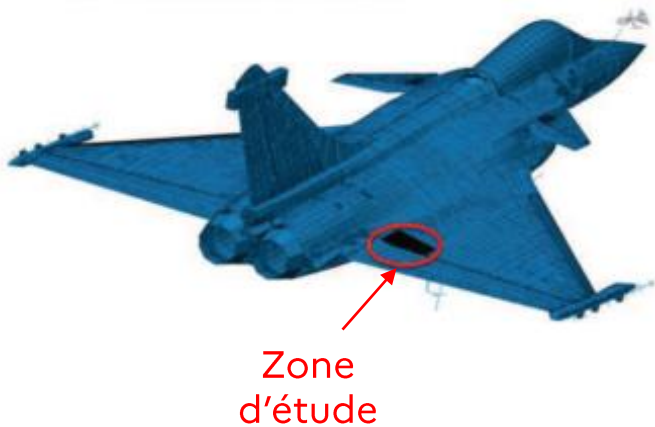
Apport de l'instrumentation pour la modélisation des réparations composites

Journée « Méthodes d'essais et d'instrumentation des
matériaux composites »

Jean Baptiste ORSATELLI & Nathalie BARRIERE



Réparation de dommages de voilure composites



Etudier des solutions de réparations collées pour des voilures composites :

- Mise en œuvre
- Stratégie de dimensionnement

Travaux menés en collaboration avec



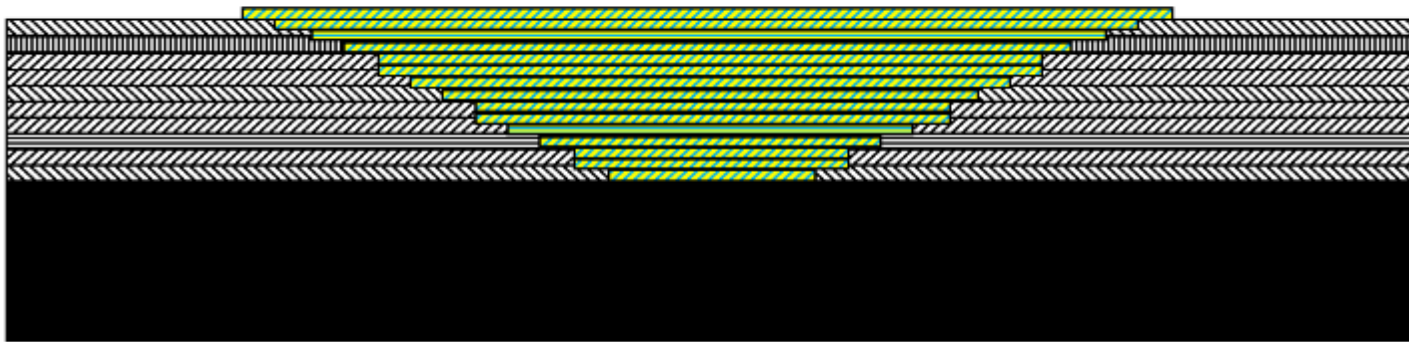
Objectif : comparer différentes stratégies de réparations collées





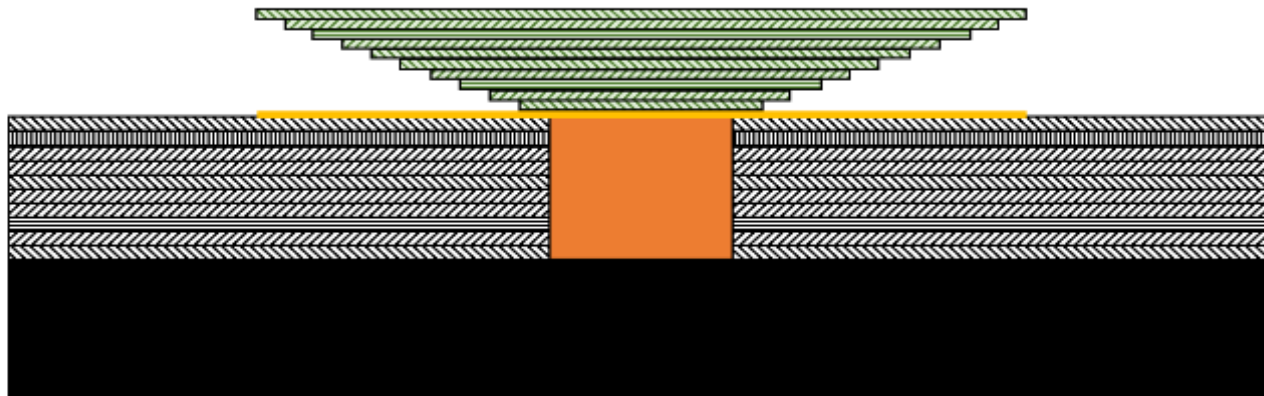
Réparation de dommages de voilure composites

Wet Lay Up



Objectif : comparer différentes stratégies de réparations collées

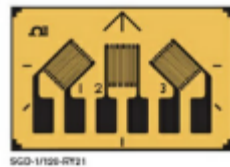
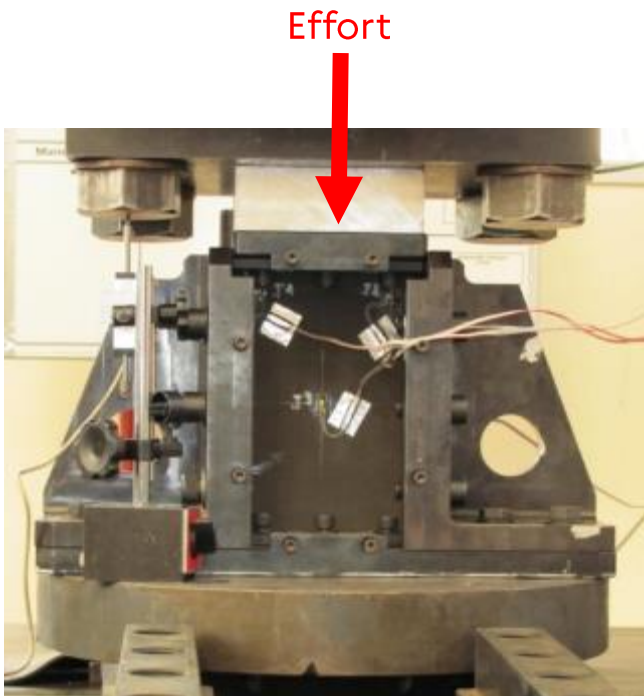
Hard Patch



24

Réparation de dommage de voilure composites

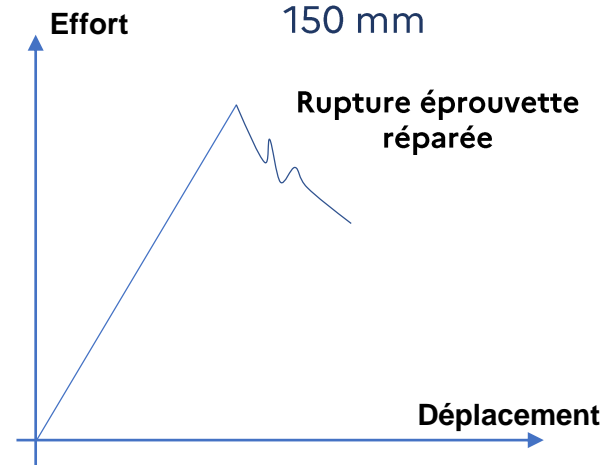
Ce que l'on faisait...



300 mm

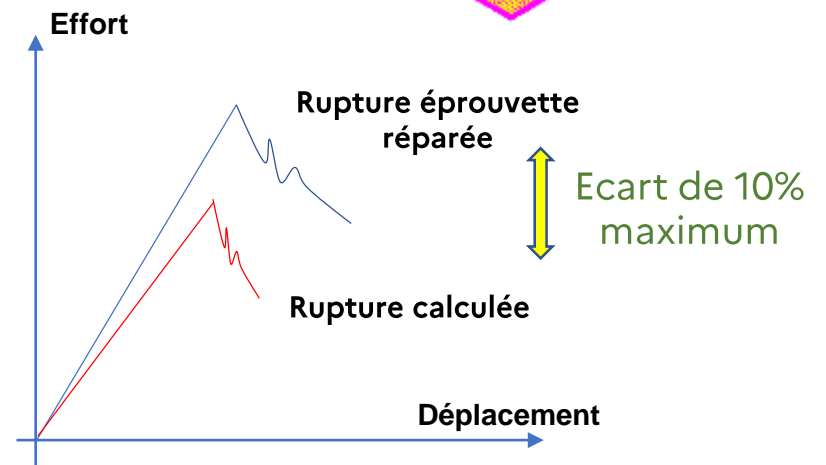
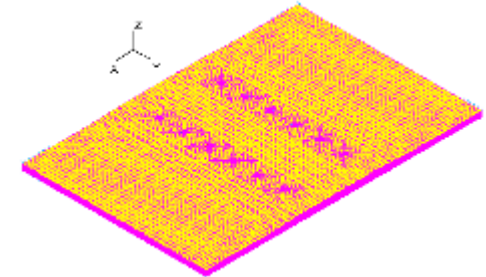
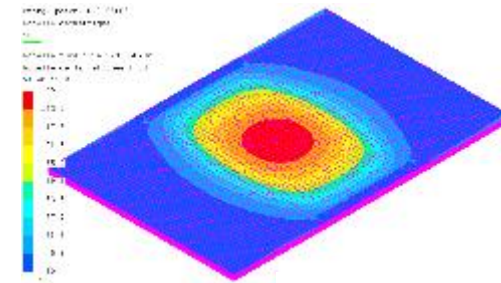
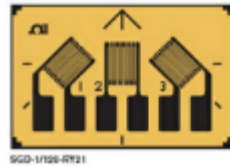
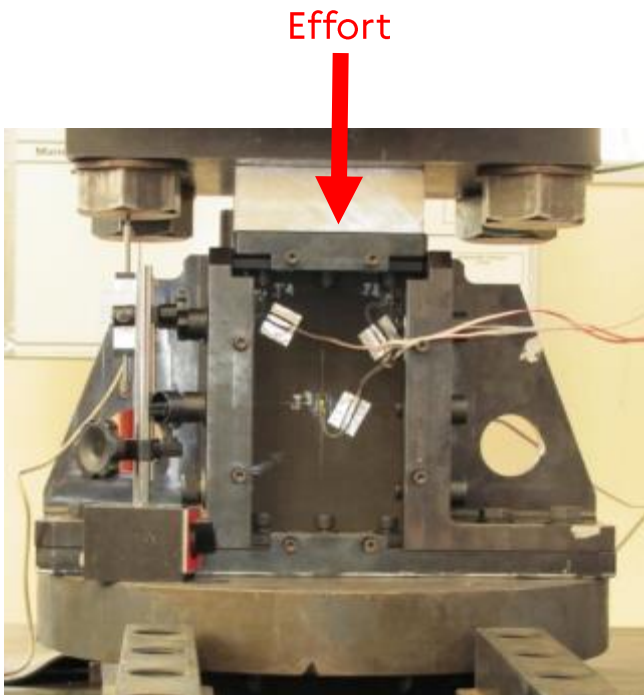


150 mm



Réparation de dommage de voilure composites

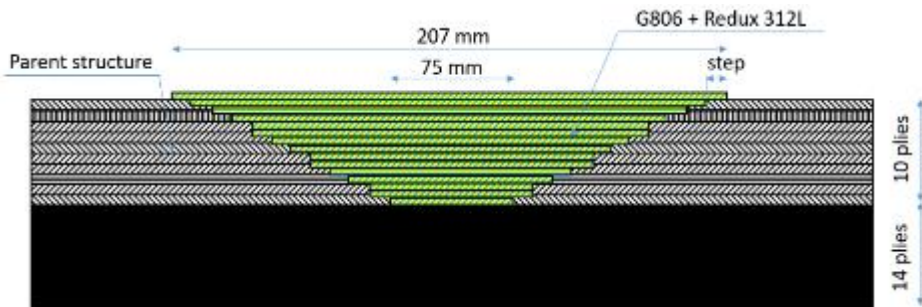
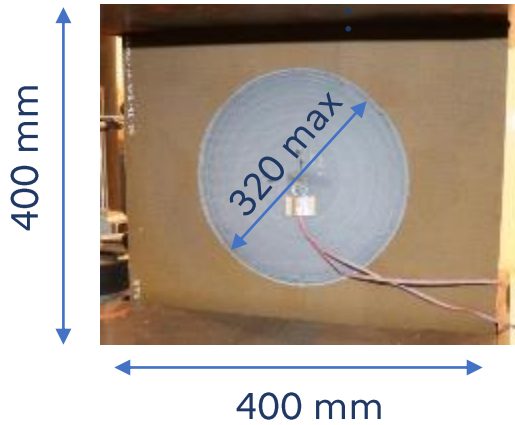
Ce que l'on faisait...





Evaluation de stratégie de réparation collées

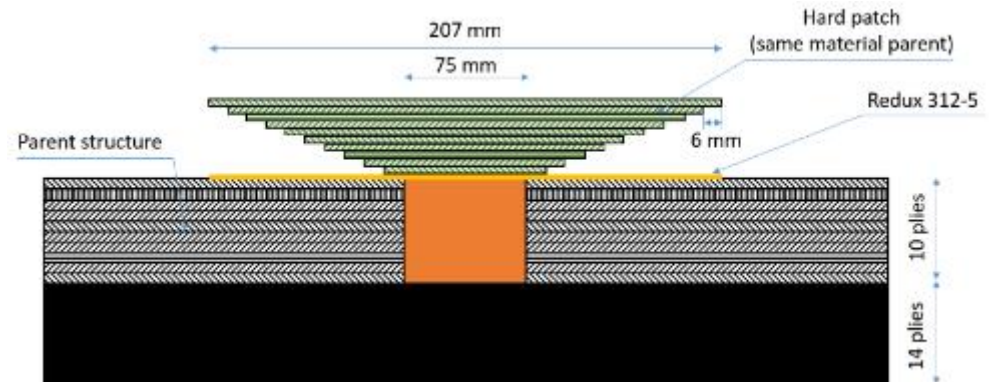
Panneau réparé représentatif (24 plis)



Réparation en wet lay up (WLU)

- Step = 6 mm (standard)
- Step = 4 mm

VS

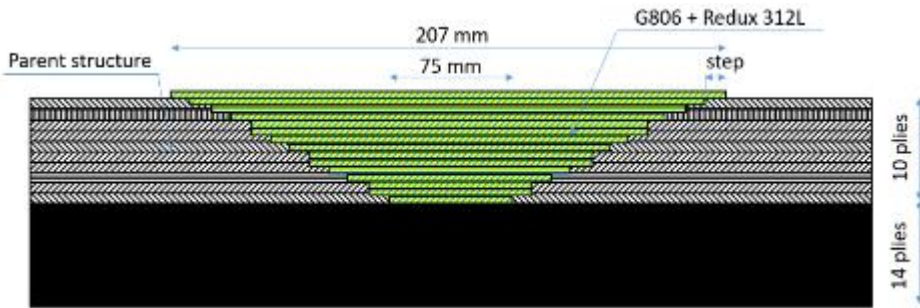


Réparation par patch externe pré-cuit / external hard patch (EHP)

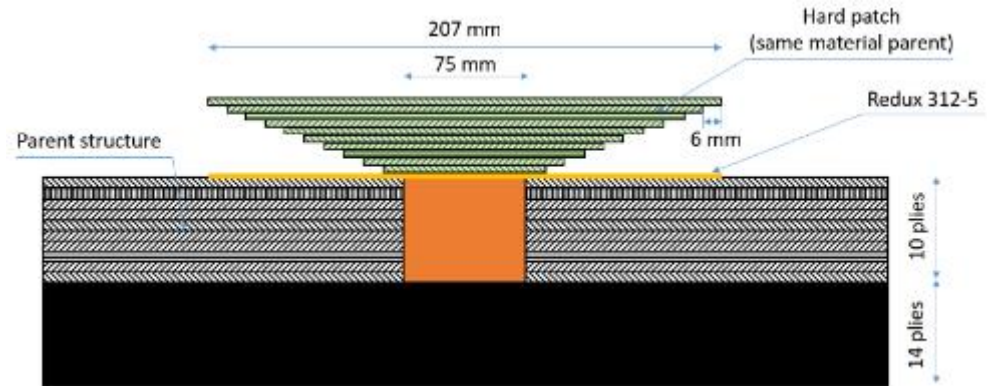


Evaluation de stratégie de réparation collées

Panneau réparé représentatif (24 plis)



VS

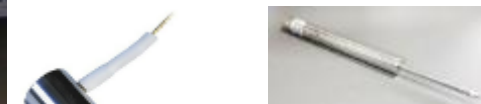


Réparation en wet lay up (WLU)

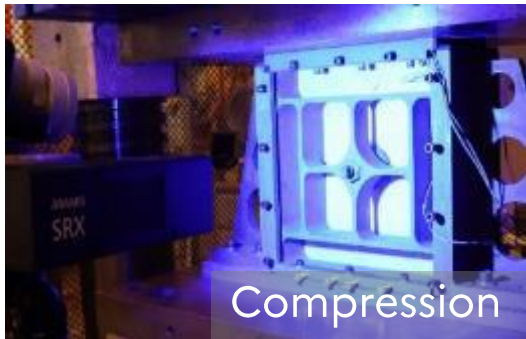
- Step = 6 mm (standard)
- Step = 4 mm

Réparation par patch externe pré-cuit / external hard patch (EHP)

Instrumentation



Caractérisation mécanique :



Compression

Direction générale de l'armement

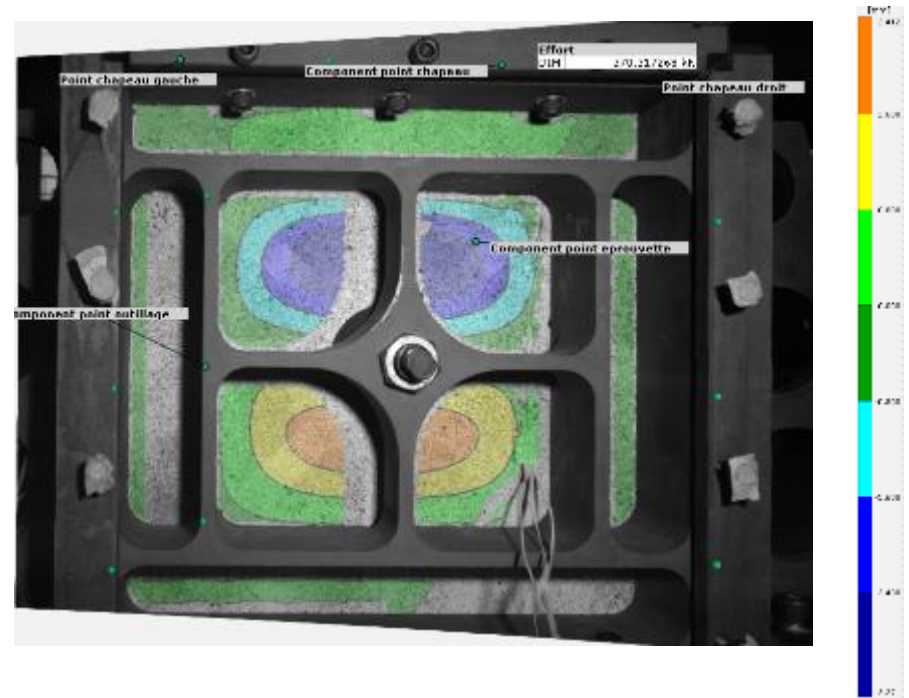


Traction



Fatigue à $R=0,1$ $f=2\text{Hz}$

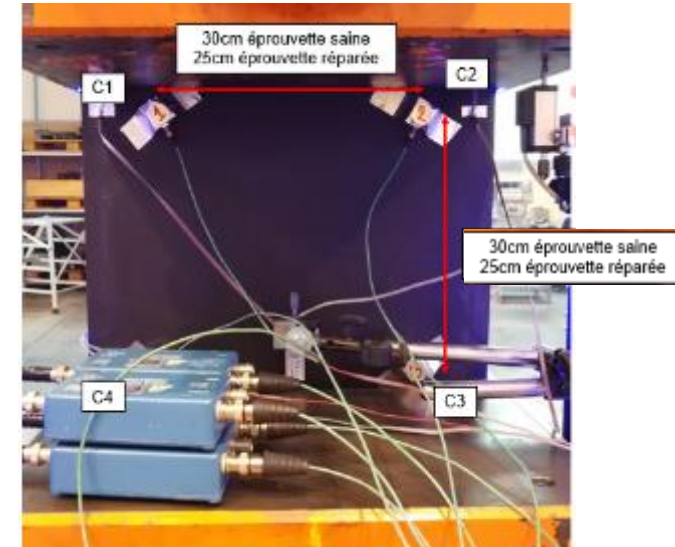
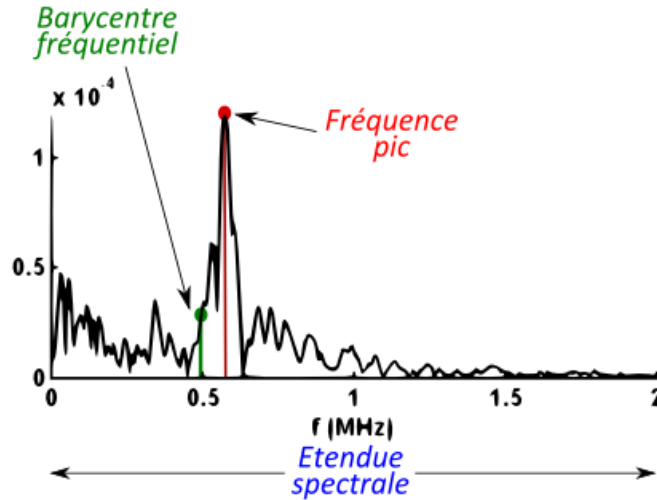
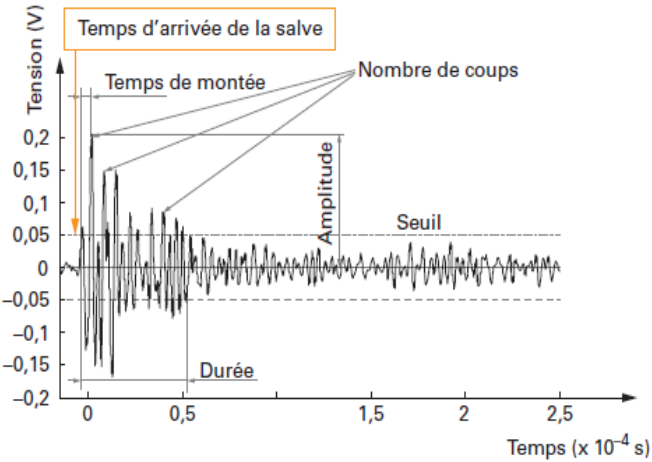
Suivi par stéréo corrélation



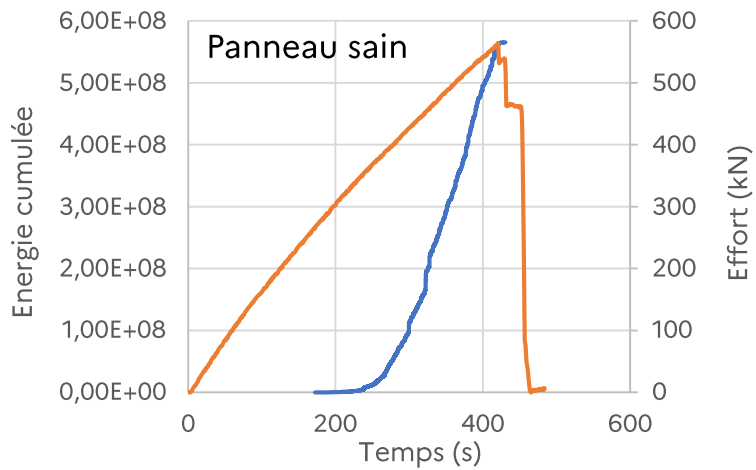
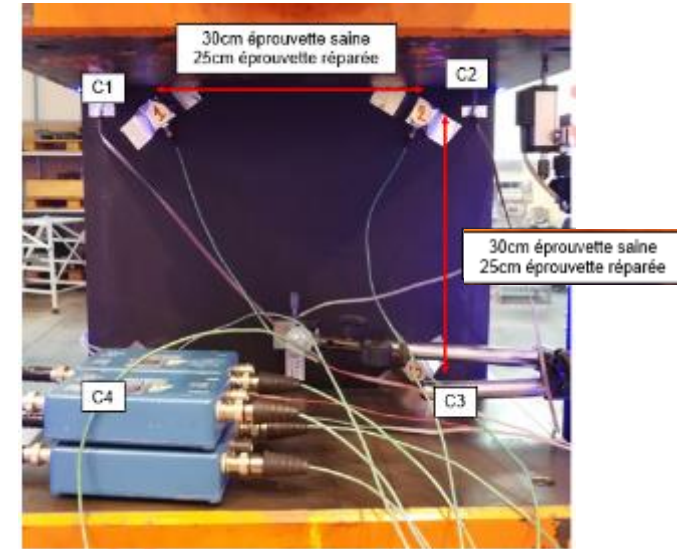
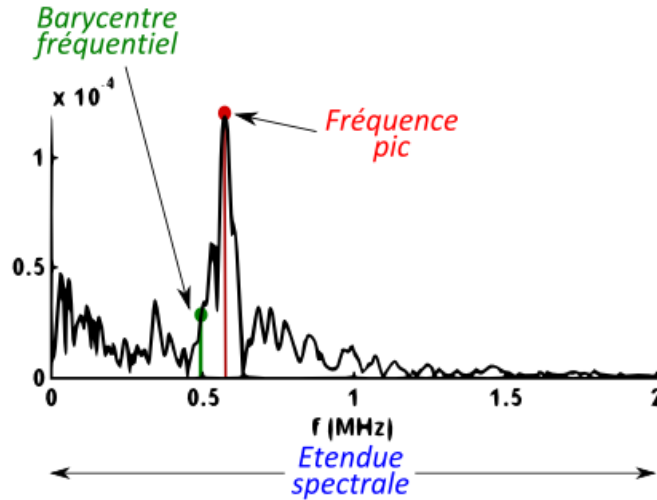
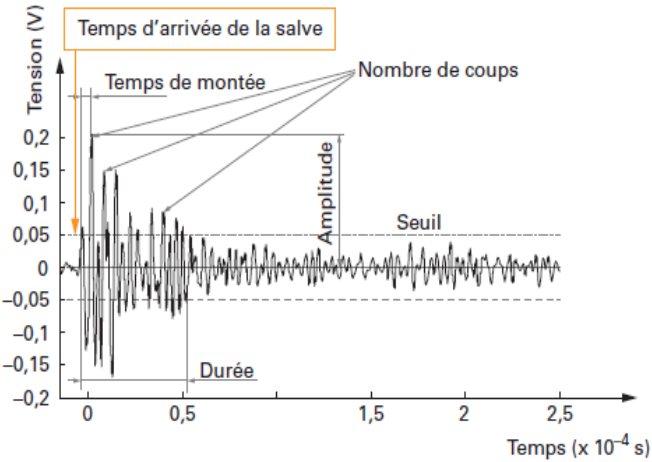
Apport de la stéréo corrélation:

- ✓ - Comportement global de la structure : flambement, chargement et conditions aux limites
- ✗ - Comportement de la réparation

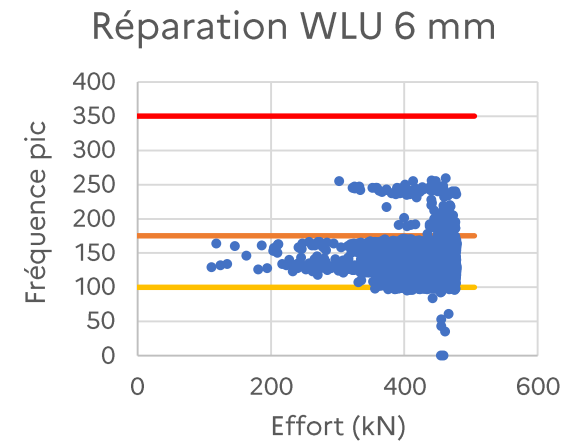
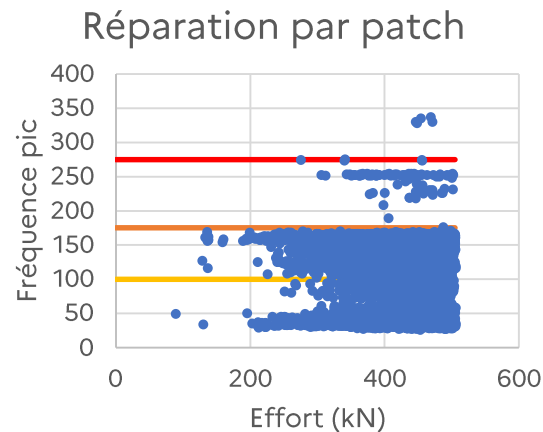
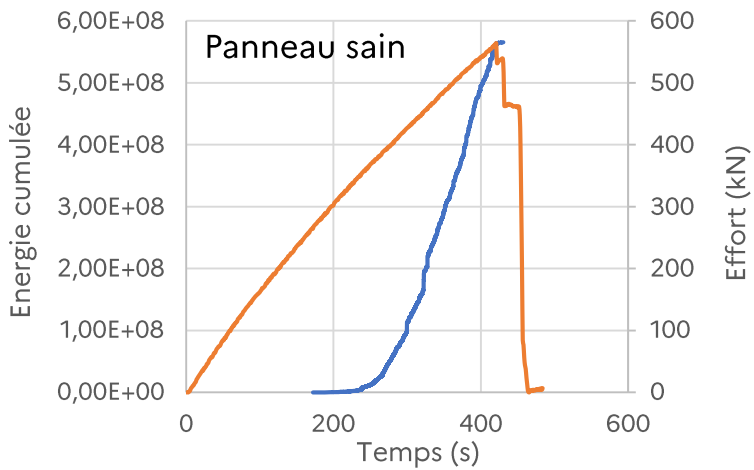
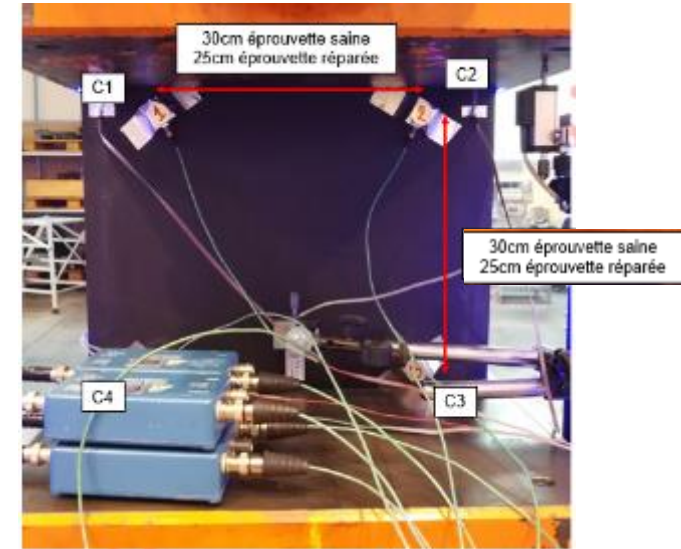
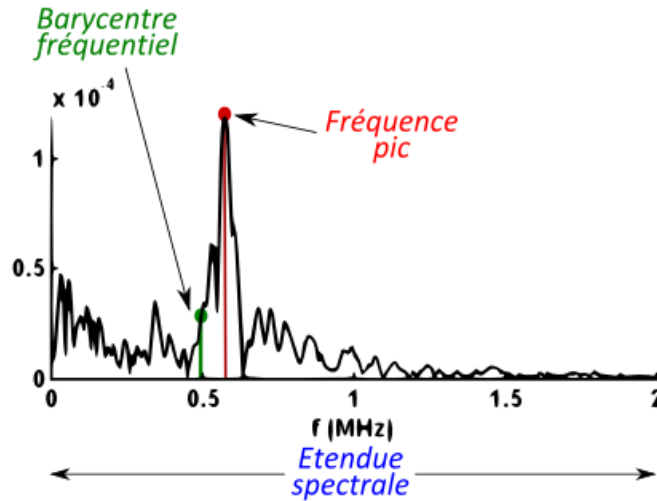
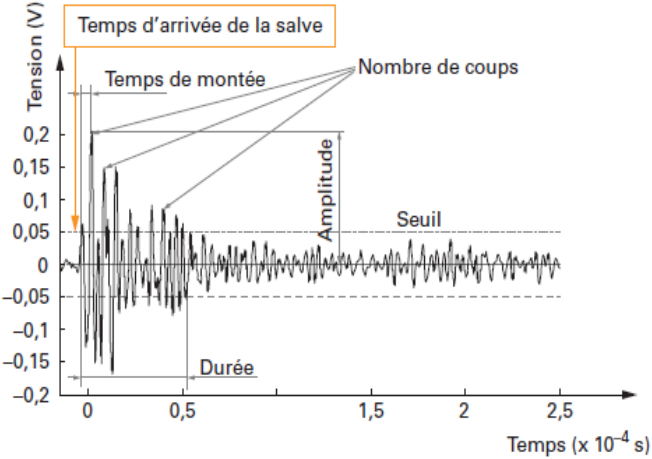
Suivi par Emissions Acoustiques



Suivi par Emissions Acoustiques



Suivi par Emissions Acoustiques



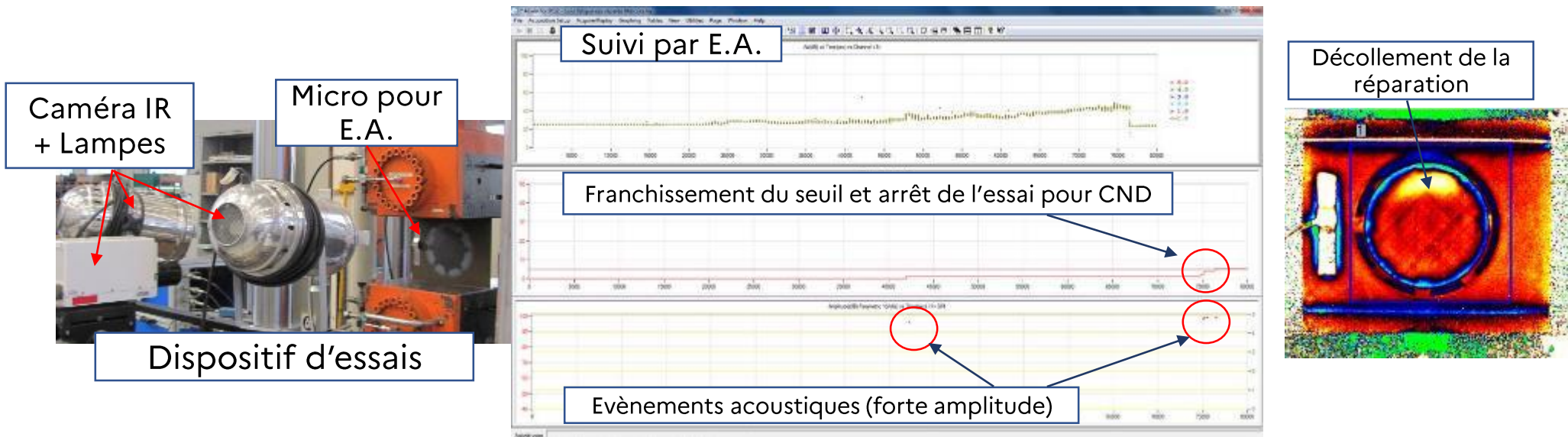
Méthode de suivi pour les essais de fatigue

CND avant essai : US et thermographie infrarouge (IR)

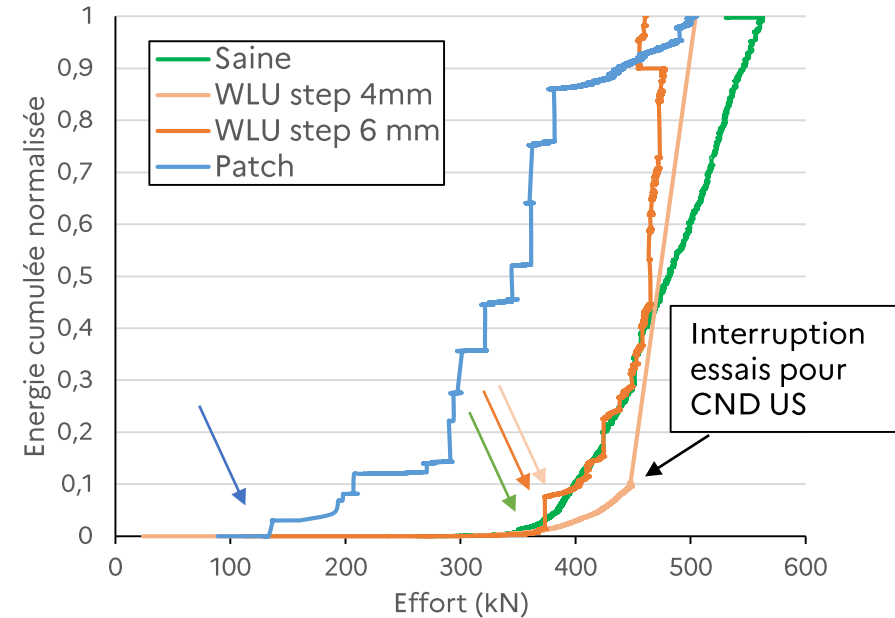
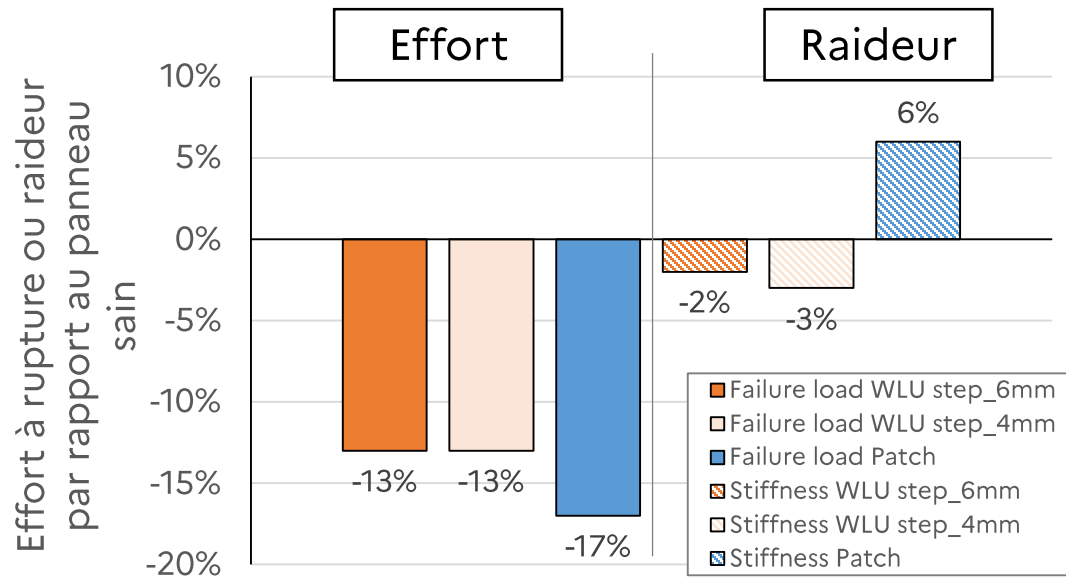
Essais de fatigue à contrainte imposée :

- $R=0,1$ pour propager un éventuel défaut au sein de la réparation
- Suivi de la réparation avec micro EA et thermographie IR active modulée
- Arrêt de l'essai à 500 000 cycles et thermographie IR active modulée

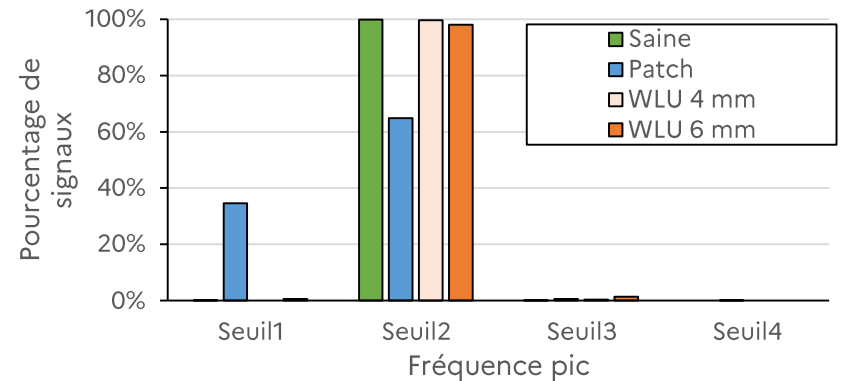
Statique résiduel en compression



Résultats des essais de traction

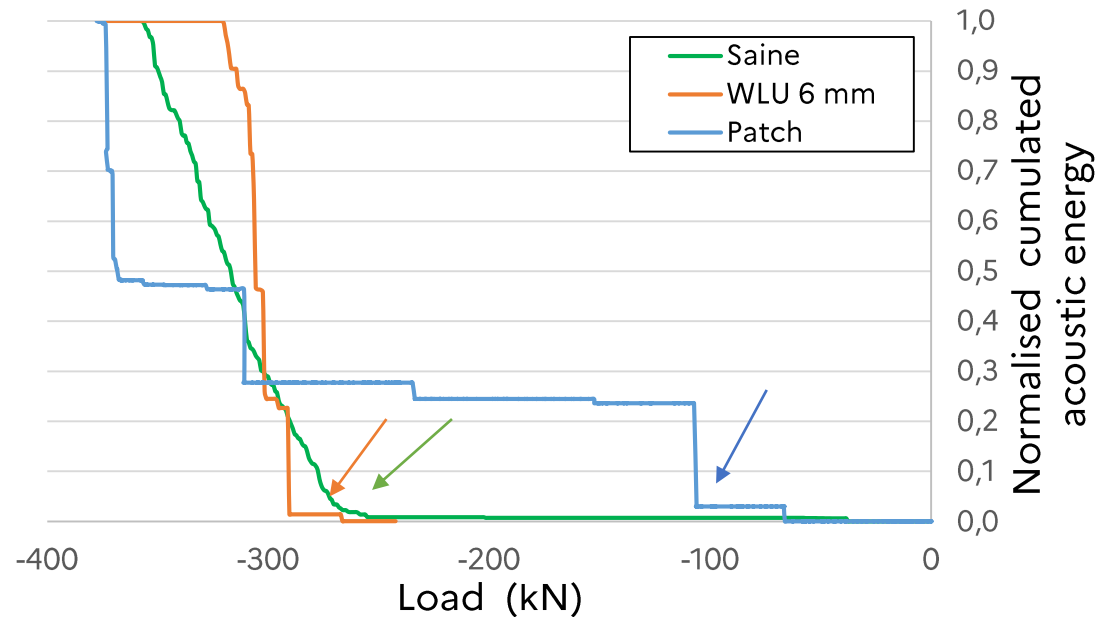
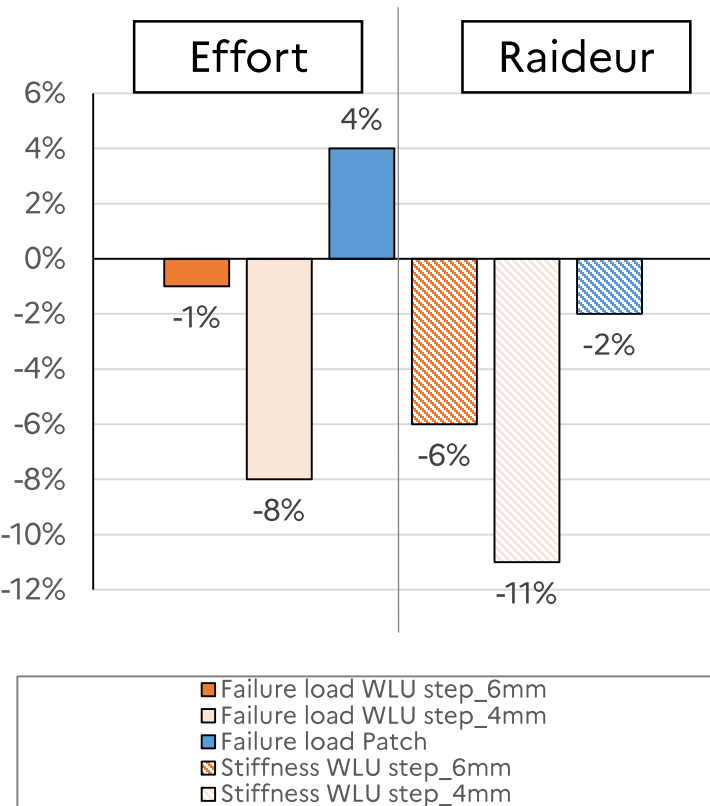


- Comportement « mécanique » en traction similaire pour les différentes réparations
- Différences d'endommagement entre les réparations



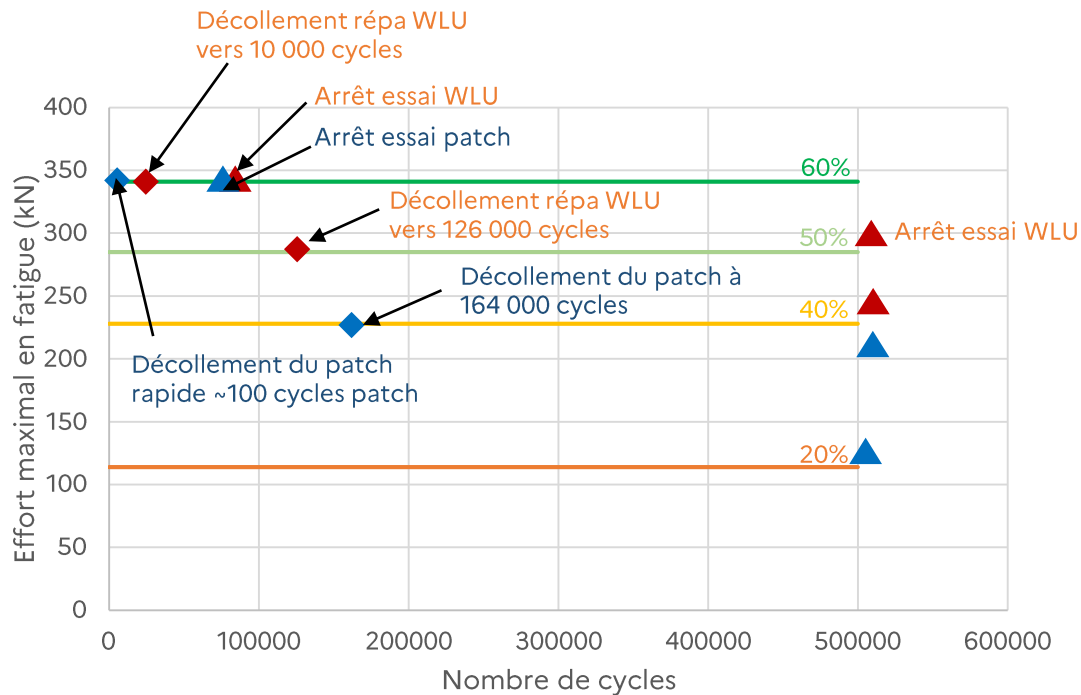
Résultats des essais de compression

Effort à rupture ou raideur par rapport au panneau sain



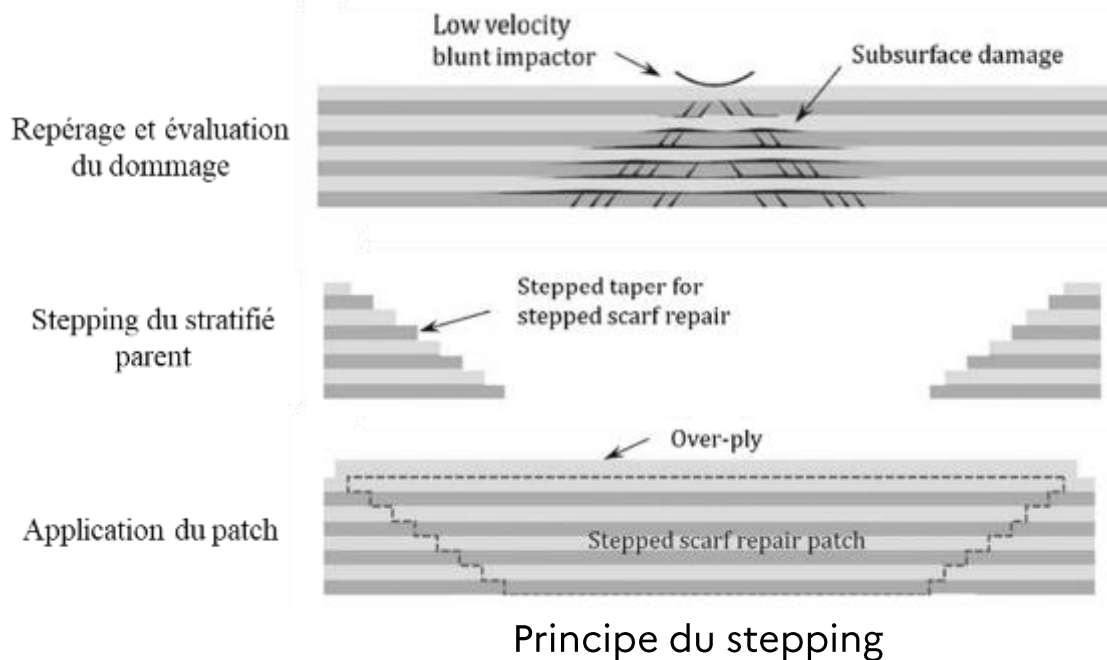
- Comportement « mécanique » en traction similaire pour les différentes réparations
- Différences d'endommagement entre les réparations

Résultats des essais de fatigue



Réparation	% Tenue saine	% Tenue réparée	Observations
Aucun (saine)	60%	-	Arrêt essais sans rupture.
Wet lay up 6 mm	40%	46%	Thermo IR : RAS en début d'essais et RAS à 500 000. Arrêt sans rupture.
	50%	57%	Ecaillage sur le côté éprouvette avant montage. Thermo IR : RAS en début d'essais. Décollement de la réparation vers 126 000 cycles. Arrêt essai à 500 000 cycles
Patch	40%	48%	Décollement du patch à 164 412 cycles. Arrêt essai à 500 000 cycles
	20%	24%	Pas d'endommagement de la réparation à 500 000 cycles

Dimensionnement de réparations en stepping



Matériaux de l'étude :

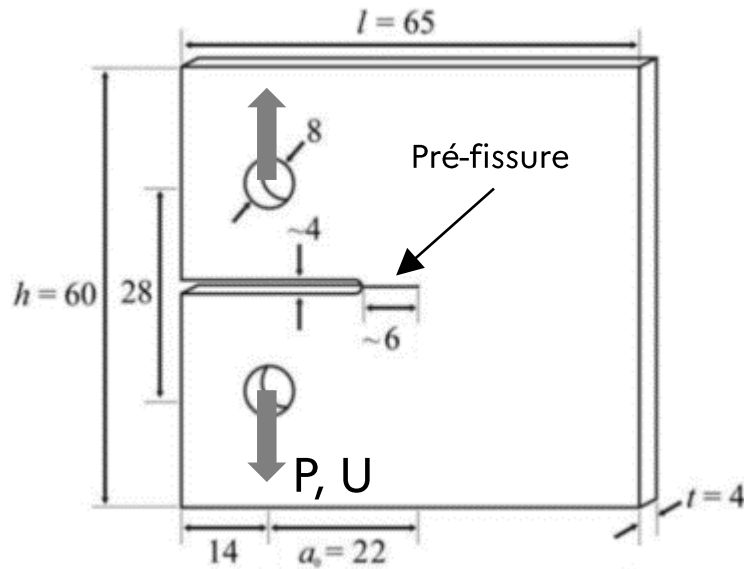
- Stratifié parent G939/M18
- Patch wet layup G939/Hexbond 312-L

Objectif : Alimenter des modèles EF avancés de réparations composites collées (CZM, délaminage, Hashin Initiation + propagation) à partir d'essais de caractérisations associés.

Essais de caractérisation réalisés :

- Stratifiés
 - T0, T45, C0, C45
 - RCIL
 - **DCB**, ENF
 - **CT sens fibre**
- Adhésif sur substrat métallique
 - Butt joint, TAST
 - **DCB**, ENF

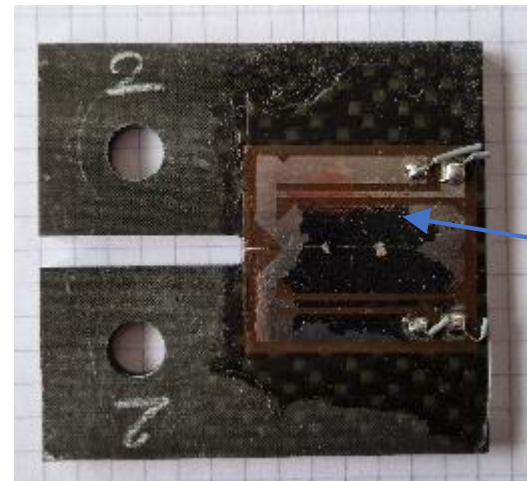
Essai CT composite



Fabrication :

- Cuisson d'une plaque de tissu carbone/époxy
- Prélèvement des éprouvettes au jet d'eau
- Entaille au à la scie à fil diamanté

Méthodologie issue des essais CT de fatigue métallique, appliquée à la fissuration de fibre

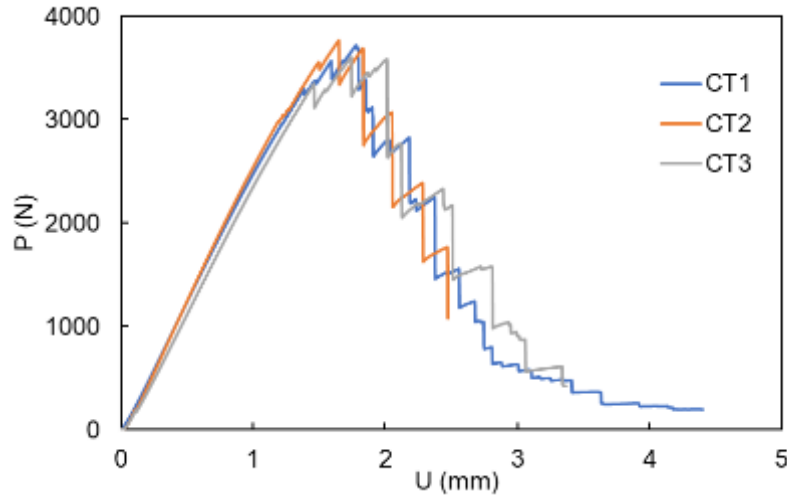


Jauge rumul de suivi de fissure

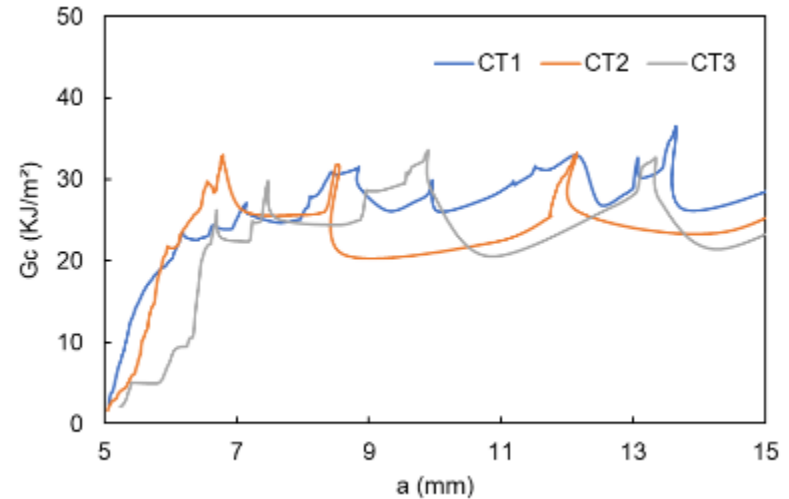
Instrumentation :

- Collage d'une rumul sur une face
 - Mesure stéréo sur la face opposée
- mesure répétable de longueur de fissure au cours de l'essai + post-traitement simplifié

Résultats et identification de G_c



Réponse en effort accidentée -> pics à la rupture des torons de fibre en sens chaîne. Bonne répétabilité des essais.

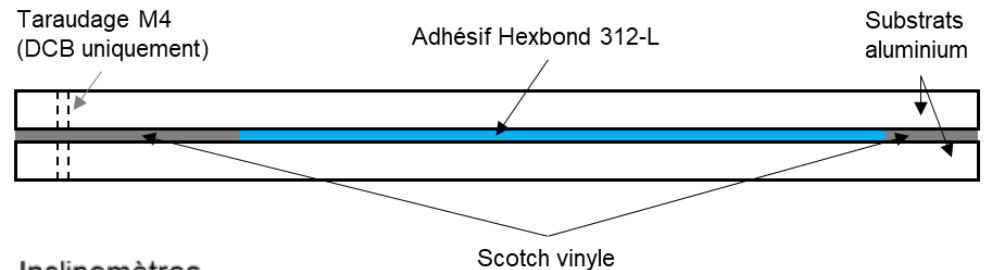
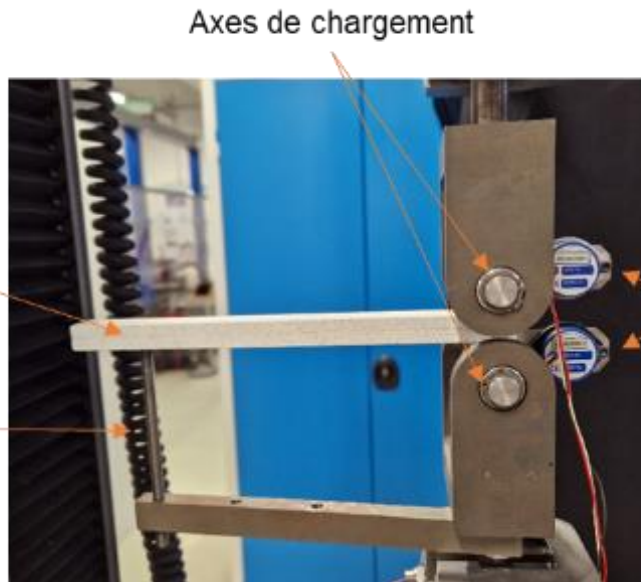
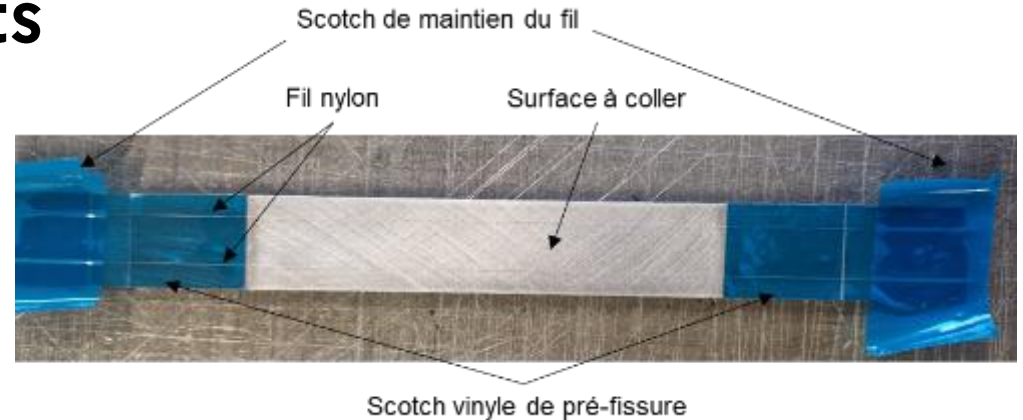


Compliance Calibration Method :

- On a $G_c = \frac{P^2}{2t} \frac{\partial C}{\partial a} \Big|_u$
- On identifie $\frac{u}{P} = C = f(a)$ de la forme $\alpha_3 a^3 + \alpha_0$
- On trace $G_c = \frac{P^2}{2t} f'(a)$

Essai DCB sur film adhésif avec mesure de rotation des substrats

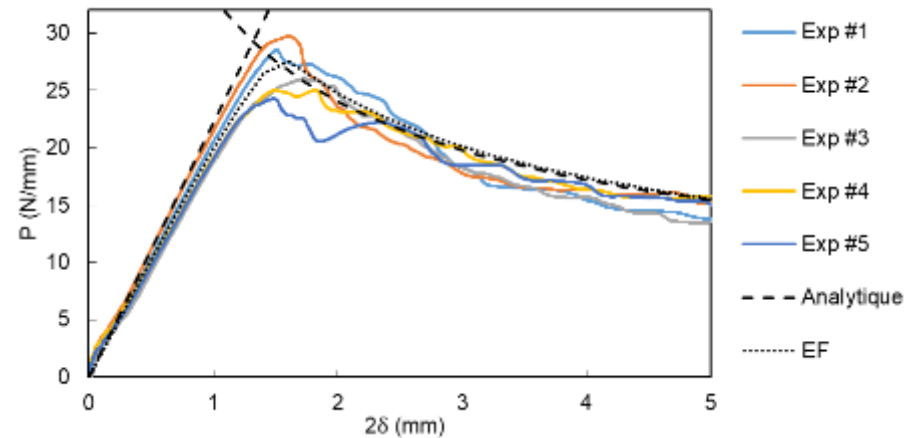
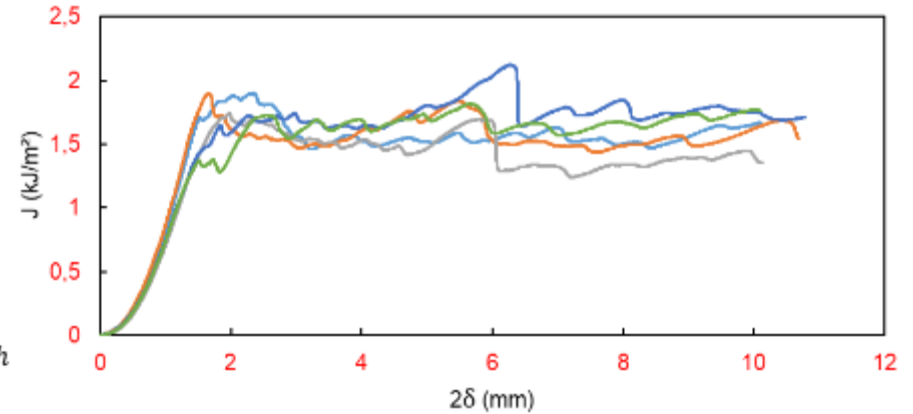
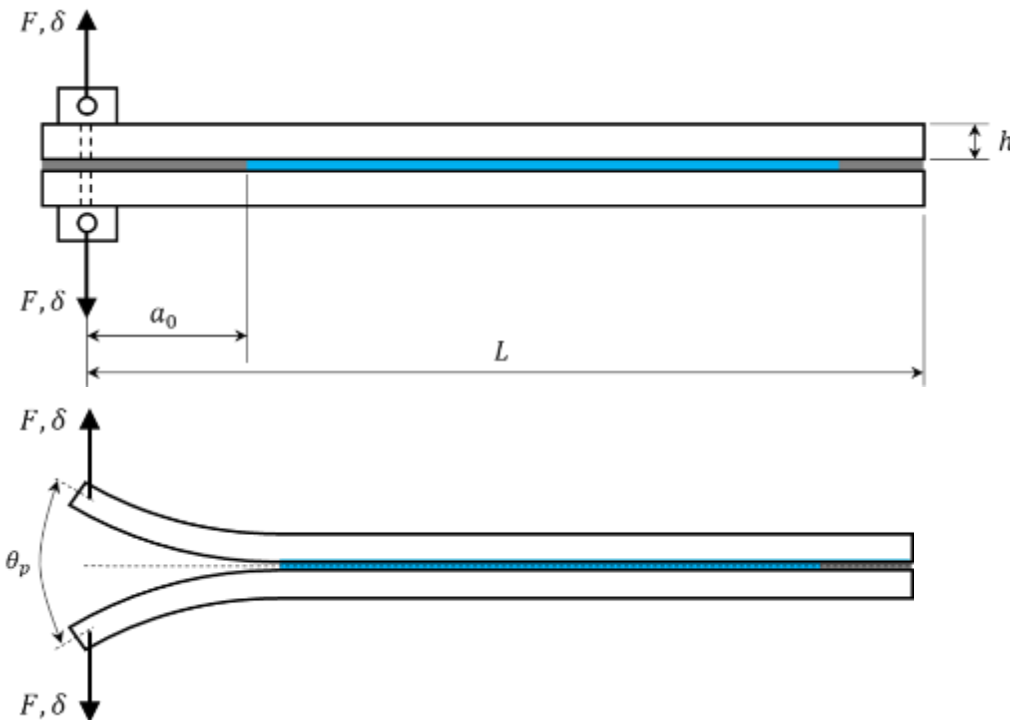
Essai de mesure de G_{IC} d'un adhésif époxy.
Préparation de surface avec primaire γ -GPS pour assurer une rupture cohésive



Instrumentation avec inclinomètres miniatures SM-NA 30 pour suivre la rotation des bras de l'éprouvette

Résultats et identification de G_{IC}

L'intégrale J de Rice donne $G_{IC} = F * \theta$
 On obtient une mesure en continue de G_c sans mesurer la longueur de fissure.



Identification inverse avec
 modèles EF et analytique MBT

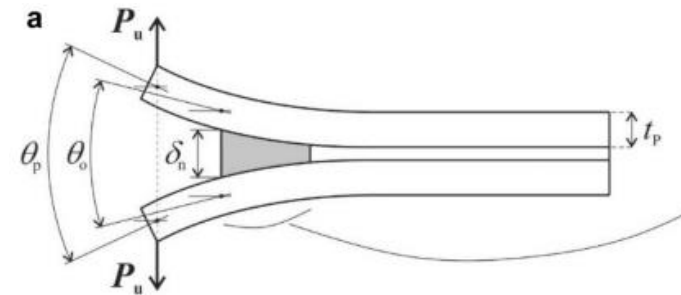
Mesure directe de loi traction-séparation

Mesure par stéréocorrélation de l'ouverture de la pointe de fissure δ_n (en micromètres...)

La contrainte à l'interface en pointe de fissure

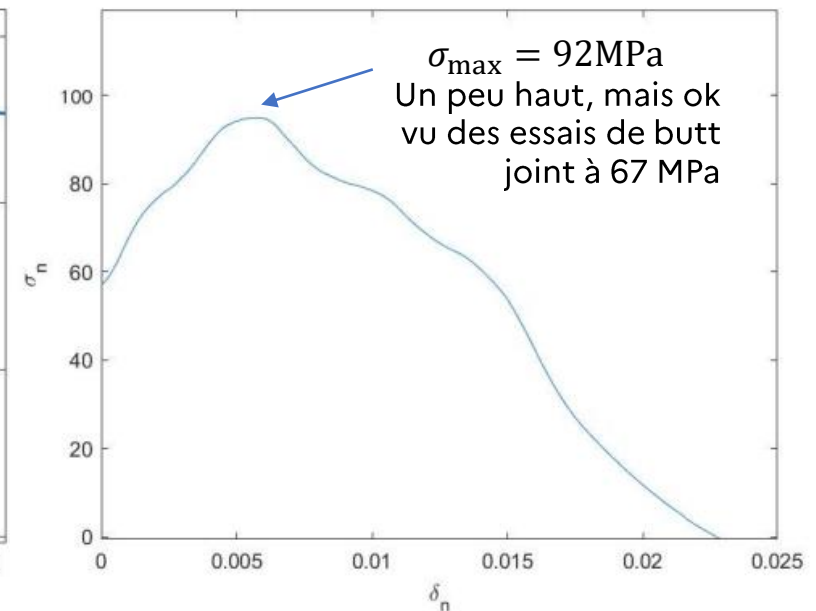
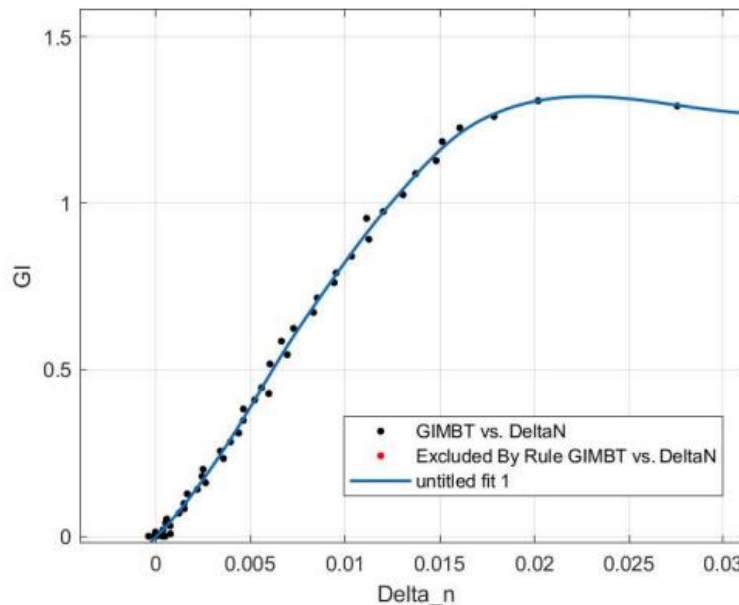
$$\text{s'écrit } \sigma = \frac{\partial G_I}{\partial \delta_n}$$

Difficultés :
 volume de mesure
 adapté, qualité du
 mouchetis et
 calibration de la
 stéréo



Mesure ouverture pointe fissure

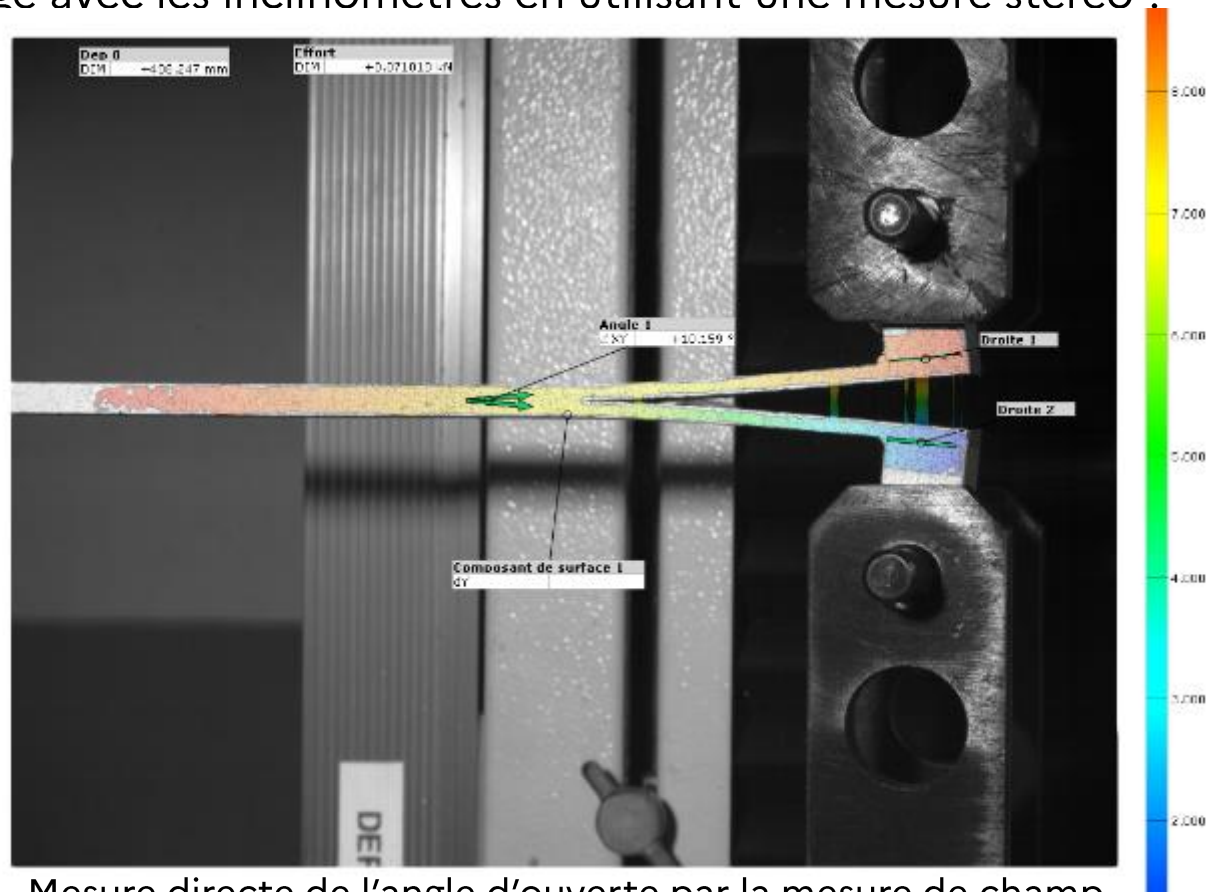
Loi traction-séparation dérivée



Application à un essai de délaminage composite

Peut-on s'affranchir de l'outillage avec les inclinomètres en utilisant une mesure stéréo ?

Essai DCB sur le matériau tissé de l'étude
(G939/M18)

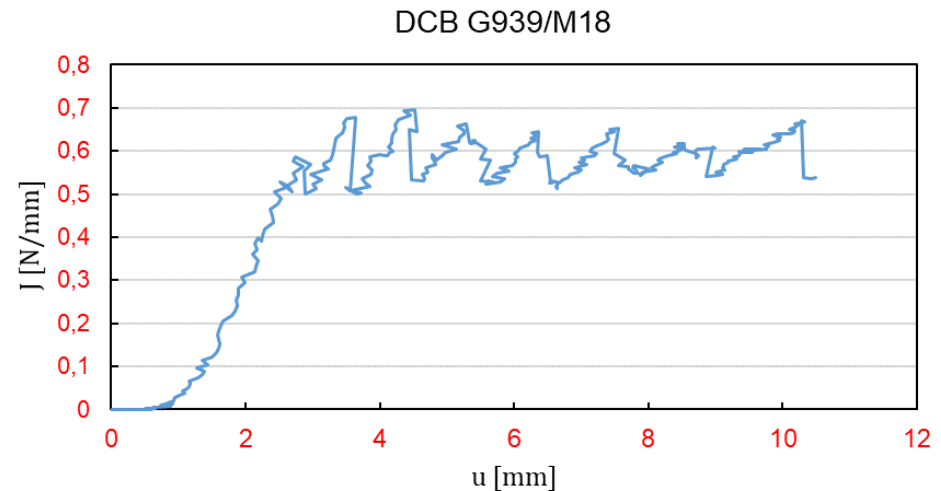


Mesure directe de l'angle d'ouverture par la mesure de champ

Application à un essai de délaminage composite

Peut-on s'affranchir de l'outillage avec les inclinomètres en utilisant une mesure stéréo ?

Essai DCB sur le matériau tissé de l'étude
(G939/M18)



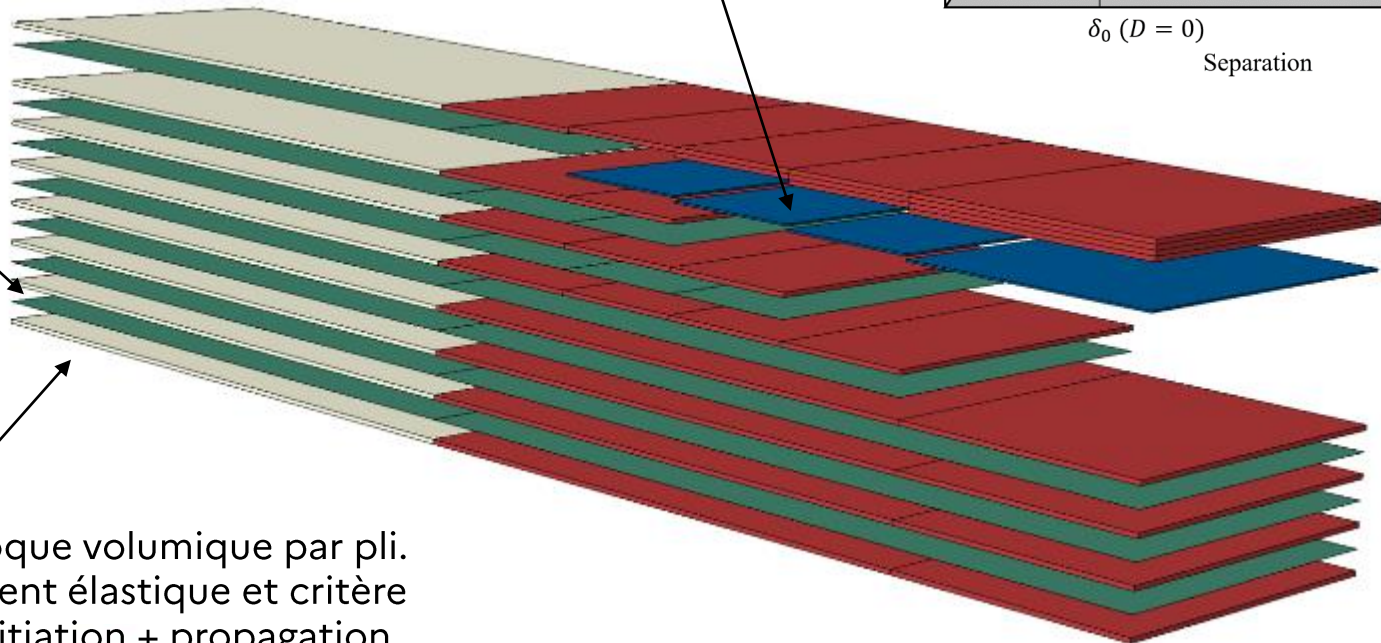
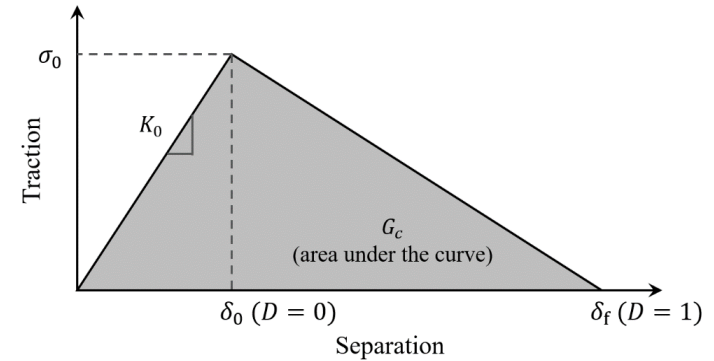
On obtient la mesure de G_c en continu sans mesure de longueur de fissure. Le motif en vague est caractéristique d'un tissu à cause du passage des torons de fibres

Modélisation d'une réparation en stepping

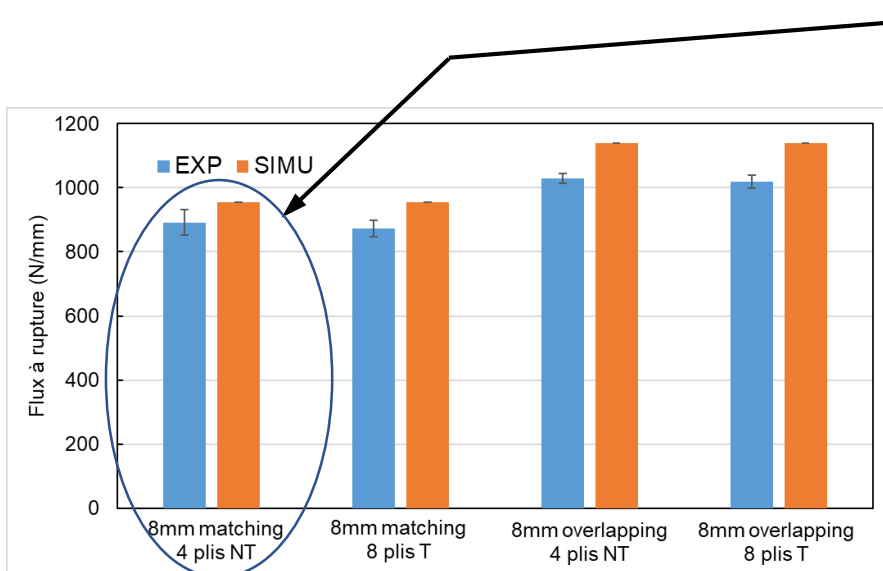
Éléments cohésifs
loi bi-linéaire pour le
délaminage,
épaisseur 1E-5 mm

1 élément coque volumique par pli.
Comportement élastique et critère
de Hashin initiation + propagation

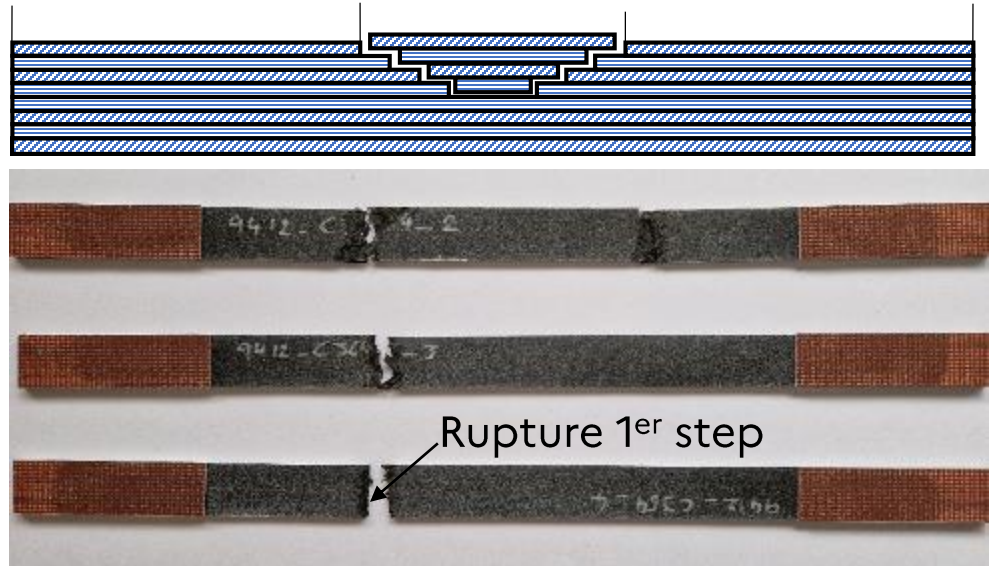
Éléments cohésifs loi bi-
linéaire pour l'adhésif,
épaisseur 0,1 mm



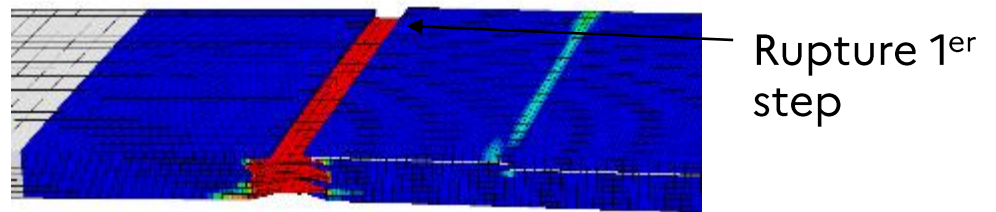
Essais de traction sur coupons réparés



Réparation sur 4 plis. Drapage identique à la plaque parente.

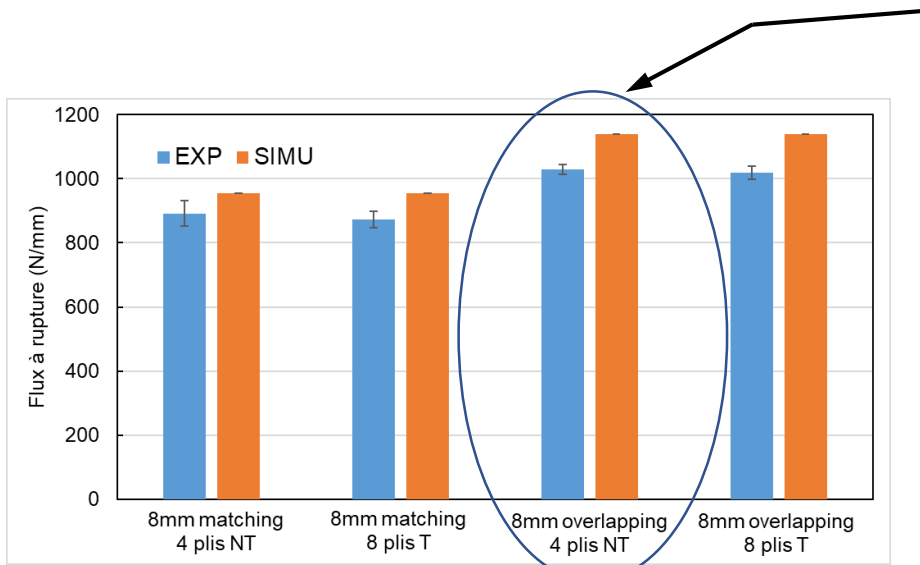


Efforts à rupture sur les configurations de réparations traversantes / non traversantes sur 2 drapages différents.

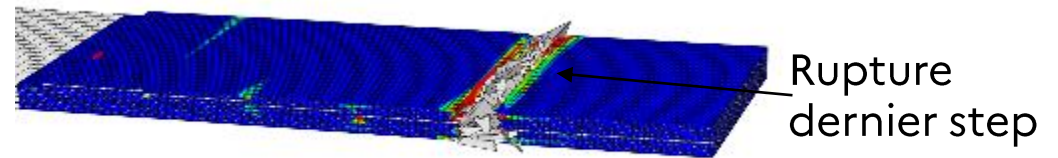
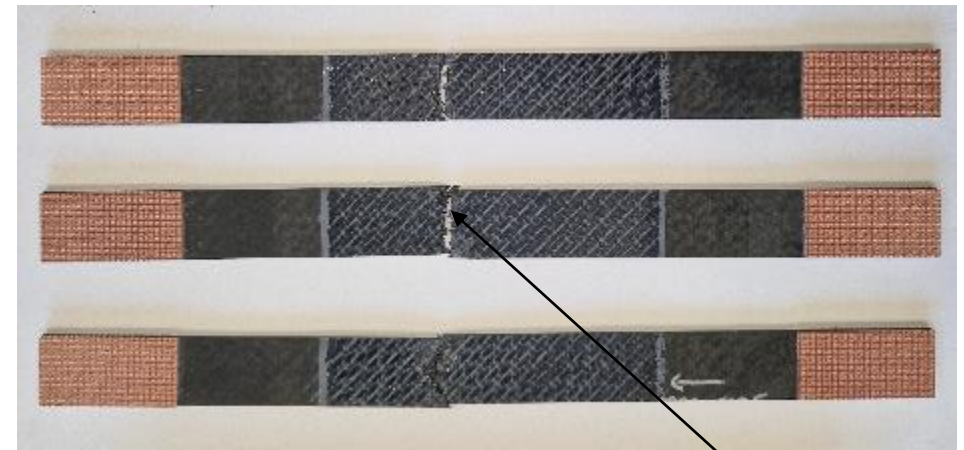
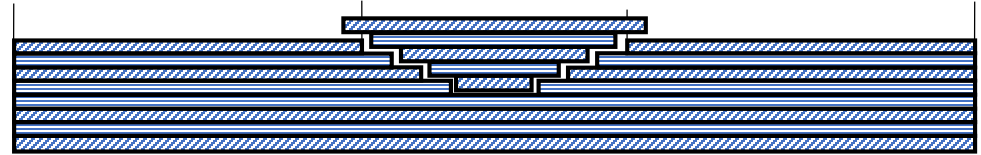


Le modèle EF retranscrit la localisation de la rupture, et l'effort max avec 5 à 10% d'écart

Essais de traction sur coupons réparés



Réparation sur 4 plis. Drapage décalé d'un pli.



Efforts à rupture sur les configurations de réparations traversantes / non traversantes sur 2 drapages différents.

Conclusions et perspectives

La multi-instrumentation pour les essais sur réparations composites :

- Emissions acoustiques
 - **différences de comportement** → réduire le nombre d'essais et les sollicitations imposées ✓
 - Identifier les paramètres pertinents pour caractériser l'endommagement
- Stéréo corrélation, jauges, inclinomètres :
 - **simplification des mesures et dépouillements** des essais de fissurations ✓
 - **identifier** l'ensemble des **propriétés** nécessaires à la modélisation (G_c , G_{13} , σ_{33} ...)
- Compléter par des mesures de **thermographie IR**
- **Valider les corrélations essais / calculs** sur petits coupons pour comprendre le comportement de panneaux représentatifs

